

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.023>



川中地区下侏罗统自流井组大二亚段陆相页岩层系岩性组合类型及其特征

雷文智^{1,2}, 陈冬霞^{1,2*}, 张芮³, 刘子驿^{1,2}, 张少敏³

1. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610400

摘要: 川中地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相页岩非均质性强, 有利岩性组合的研究对目标层段的选取较为关键。通过对 21 口井的岩心观察与描述、有机质含量与主微量元素测定等, 划分了岩性段及组合类型, 并探讨了各组合类型特征。结果表明: 大二亚段页岩层系主要发育泥质介壳灰岩、灰黑色页岩、含介壳页岩 3 类岩性, 针对其生物介壳发育的特征, 识别出特殊的介壳层岩性段; 进一步总结出 4 类岩性段类型, A 块状介壳灰岩段、B 页岩与介壳层互层段、C 页岩夹介壳层段、D 纯页岩段。4 类岩性段的古环境特征差异反映了不同的页岩油潜力, 半潮湿—潮湿的古气候、较高的古生产力、合适的沉积速率, 以及缺氧还原、半咸水—淡水环境有利于有机质的富集与保存, 由此综合优选出有利岩性段类型为 C 页岩夹介壳层段, D 纯页岩段次之。

关键词: 陆相页岩; 页岩油; 大安寨段; 含介壳页岩; 页岩岩性组合类型; 沉积环境; 油气。

中图分类号: P588.22

文章编号: 1000-2383(2021)10-3657-16

收稿日期: 2020-10-27

Lithological Combination Types and Characteristics of Continental Shale Strata in the Second Sub-Member of Da'anzhai in Central Sichuan

Lei Wenzhi^{1,2}, Chen Dongxia^{1,2*}, Zhang Rui³, Liu Ziyi^{1,2}, Zhang Shaomin³

1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Exploration and Development Institute, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610400, China

Abstract: The lacustrine shale in the Da'anzhai Member of Ziliujing Formation of Lower Jurassic in Central Sichuan has strong heterogeneity, and the study of favorable lithological combinations is critical to the selection of the target interval. Through the observation and description of cores of more than 21 wells, the determination of organic matter contents and major and trace elements, it classifies lithological combinations and discusses the characteristics of each type. The results show that the shale strata of Da2 sub-member mainly developed three types of lithology: muddy shell limestone, gray-black shale, and shell-bearing shale. Then, according to the characteristics of its biological shell development, the special shell-rich layer was identified. Furthermore, it summarizes 4 types of lithological sections: A massive shell limestone section, B shale and shell-rich layer interbedded section, C shale intercalated shell-rich layer section, D pure shale section. The differences in paleoenvironmental characteristics of the 4

基金项目: 国家科技重大专项 (No. 2016ZX05034001-005).

作者简介: 雷文智 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事非常规油气成藏研究. ORCID:0000-0002-9651-4350. E-mail:18382244604@163.com

* **通讯作者:** 陈冬霞, E-mail:Lindachen@cup.edu.cn

引用格式: 雷文智, 陈冬霞, 张芮, 等. 2021. 川中地区下侏罗统自流井组大二亚段陆相页岩层系岩性组合类型及其特征. 地球科学, 46(10): 3657-3672.

lithological sections types reflect different shale oil potentials. Therefore, comprehensive analysis indicates that from semi-humid to humid paleoclimate, high paleoproductivity, suitable deposition rate, as well as anoxic reduction, brackish-freshwater environment are conducive to the enrichment and preservation of organic matter. Finally, the favorable lithology section types as C shale intercalated shell-rich layer section were comprehensively optimized, followed by D pure shale section.

Key words: continental shale; shale oil; Da'anzhai Member; shell-bearing shale; shale lithology combination type; sedimentary environment; hydrocarbon.

0 引言

近 10 年以来,我国多个盆地的陆源页岩层系取得重大勘探进展.如东部济阳拗陷古近系沙四上亚段—沙三下亚段页岩段累计产油 11×10^4 t, 沧东拗陷孔二段页岩油资源量达 6.8×10^8 t, GD6x1 井在页岩目的层大规模体积压裂后日产油 28 t(李志明等, 2019;赵贤正等, 2019). 吉木萨尔拗陷芦草沟组页岩具有整体含油的特征,资源量达 15.8×10^8 t, 并且吉 25 井压裂试油日产 18.25 t、鄂尔多斯盆地长 7 段页岩油水平井单井平均产油 12.5 t/d、江汉盆地潜江组页岩层系已累产油 4.2×10^4 t, 表明我国页岩油具有良好的勘探开发潜力(吴世强等, 2013;高阳等, 2020;付锁堂等, 2020). 中国陆相页岩岩性组合类型

多样, 并且岩性组合、岩相对页岩油储层的发育以及含油性等特征具有控制作用, 例如济阳拗陷沙四段富有机质纹层状岩相具有良好的储集性和含油性(宋明水等, 2020), 沧东拗陷孔二段纹层状长英质页岩组构相中页岩油最为富集(赵贤正等, 2019), 松辽盆地青山口组中等有机质含量纹层状长英质泥岩相为页岩油滞留的有利岩相(柳波等, 2018), 富有机质粉砂级长英质与富凝灰质纹层为鄂尔多斯盆地长 7₃ 亚段页岩油发育层系(惠克来等, 2020).

四川盆地侏罗系石油资源丰富, 生油量 285.71 亿 t, 其中下侏罗统自流井组大安寨段页岩油资源量可达 172 亿 t(内部资料), 秋林 19 井大安寨段页岩直井压裂获得工业油流, 日产原油 7.2 m³/d, 天然气

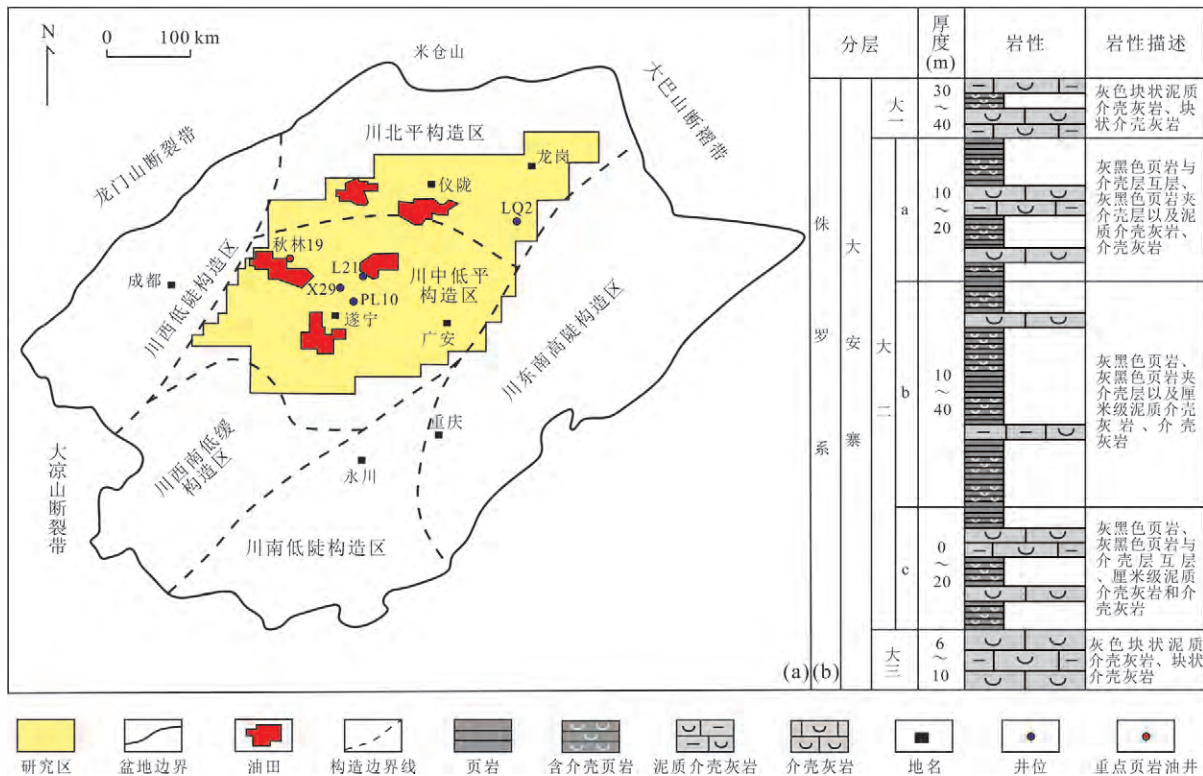


图 1 研究区位置图(a)及大安寨段陆相页岩油气层系综合柱状图(b)

Fig.1 The location map of the study area (a) and stratigraphic column for the continental shale oil and gas strata in the Da'anzhai Member (b)

2.3×10³ m³,表明大安寨段拥有巨大的页岩油勘探潜力.大安寨页岩特殊性在于生物介壳发育,以介壳层夹层、互层或介壳灰岩段为特征.目前部分学者针对大安寨段页岩的岩相、岩性组合进行了研究(刘忠宝等,2019;王玮等,2019),但并未对各种岩性段的特征进行进一步的刻画,未建立一套适合大安寨勘探开发的岩性组合划分方案,由此制约了勘探开发中优质页岩层段的识别与选取.本文在考虑介壳发育这一特殊性的基础上,结合岩性纵向发育特征,从沉积韵律的角度划分、建立了一套大安寨页岩的岩性类型发育模式,并针对各类岩性段的古环境特征、有机碳含量等参数进行了表征,以此评价优选出有利的岩性段类型,为后续大安寨页岩高效勘探开发提供支撑.

1 区域地质背景

研究区位于四川盆地中部地区,面积约4万 km²,累计发现中台山、公山庙、金华、莲池和桂花等

5个油田和18个含油气构造.构造位置位于川中低平构造区以及川北低平构造区南部,处于龙泉山断裂东侧,西靠华蓥山深断裂(谢武仁等,2010)(图1a);下侏罗统自流井组大安寨段经历了大规模的湖侵期,湖盆面积广,为典型的淡水湖盆.大安寨段岩性以灰色泥质介壳灰岩与灰黑色泥页岩为主.地层从老到新可分为大三亚段、大二亚段、大一亚段3个亚段,大三亚段为湖盆水进期,大二亚段为最大湖泛期,大一亚段为湖盆水退期(黄东等,2018).其中,大一、大三亚段以发育滨浅湖高能介壳滩为主,大二亚段主要发育半深湖—深湖泥页岩,为页岩油的勘探目的层段(杨跃明等,2019)(图1b).

2 样品采集及分析测试

本次研究所用样品选自4口取心井的大安寨段页岩层系:PL10井、X29井、L21井、LQ2井,分别取样25件、15件、7件、6件(表1,详见附表1),其中

表1 大安寨段部分样品有机碳含量及主微量元素含量

Table 1 Contents of TOC and major and trace element of part of samples in the Da'anzhai Member

样品号	深度 (m)	TOC (%)	主量元素(%)						微量元素(10 ⁻⁶)								
			Fe	Mn	Ca	Mg	K	Na	Al	Sr	Ba	Ni	V	Cr	Ce	La	Yb
PL10-3	2 035.7	0.40	3.56	0.03	32.09	0.62	0.71	0.24	3.20	917.60	257.20	44.58	38.94	38.06	55.88	22.90	2.87
PL10-6	2 031.6	0.99	3.52	0.05	13.35	1.10	2.02	0.31	8.30	230.00	525.60	32.74	122.14	91.16	53.00	25.28	2.01
PL10-7	2 029.8	0.60	5.96	0.13	5.01	1.32	2.17	0.33	9.29	243.80	489.80	41.14	108.98	109.36	72.02	33.08	2.73
PL10-12	2 022.7	0.73	4.06	0.04	2.20	1.24	2.45	0.35	10.30	404.20	534.80	36.38	112.62	84.42	49.02	25.66	2.22
PL10-14	2 021.1	0.69	1.95	0.09	47.46	0.39	0.18	0.07	1.07	1 004.00	230.60	8.88	12.69	9.57	9.99	4.90	0.42
PL10-17	2 019.1	1.41	4.73	0.03	2.63	1.22	2.60	0.38	10.32	196.70	647.80	49.20	115.88	109.42	61.74	30.74	2.68
PL10-22	2 014.3	2.90	5.18	0.03	1.64	1.27	2.66	0.40	10.61	166.72	659.60	49.82	173.30	105.38	48.04	24.28	2.14
PL10-32	1 998.6	1.61	4.28	0.02	0.95	1.69	3.26	0.53	11.23	212.00	751.60	45.80	218.60	124.10	53.50	26.22	2.22
X29-1	1 983.6	0.25	0.69	0.02	51.56	0.56	0.22	0.04	0.92	439.60	101.46	8.09	11.54	14.89	6.06	2.99	0.21
X29-2	1 986.0	0.57	1.21	0.03	44.64	0.32	0.50	0.07	2.10	896.80	214.20	12.18	21.36	22.04	14.04	6.85	0.48
X29-6	1 996.2	0.41	4.17	0.02	1.39	1.47	3.33	0.34	12.15	140.86	597.80	53.52	192.86	143.54	82.72	39.22	2.68
X29-12	2 005.5	0.70	6.22	0.03	6.91	1.34	1.63	0.17	7.52	392.00	370.00	36.20	95.84	72.64	49.64	21.60	2.11
X29-13	2 006.8	0.68	4.91	0.03	1.90	1.57	3.10	0.28	11.77	224.40	625.40	49.42	130.50	129.88	68.66	32.80	2.28
LQ-3	2 118.7	1.18	1.80	0.07	40.95	0.64	0.41	0.11	1.79	2 126.00	387.40	9.44	24.72	14.58	14.77	7.17	0.68
LQ-5	2 113.8	1.11	4.48	0.06	0.71	1.32	2.17	0.91	8.69	151.08	642.80	45.04	119.52	104.24	62.20	29.94	3.06
LQ-7	2 110.4	0.48	0.96	0.08	45.90	0.53	0.30	0.16	1.42	1 178.20	191.00	9.78	17.92	14.14	13.04	6.01	0.45
LQ-12	2 088.5	2.50	3.30	0.05	13.27	0.79	1.72	0.37	6.83	510.00	541.20	44.84	105.20	68.20	126.30	51.26	4.25
L21-1	1 965.7	0.75	6.03	0.09	1.23	1.79	3.02	0.36	11.23	165.90	602.80	46.94	152.32	127.16	86.42	40.30	2.80
L21-6	1 958.7	0.36	4.21	0.03	4.61	1.42	2.88	0.33	10.83	241.60	590.80	47.76	151.66	116.66	82.08	39.34	2.42
L21-8	1 955.4	0.89	3.63	0.05	10.40	1.21	2.66	0.30	10.22	269.00	724.00	47.78	133.06	113.28	77.66	35.76	2.59
L21-9	1 952.7	0.53	4.56	0.04	0.94	1.21	2.91	0.34	11.18	118.28	647.80	58.00	198.24	138.84	111.86	51.84	3.74
L21-11	1 948.6	0.66	1.44	0.05	41.32	0.31	0.46	0.10	2.03	898.20	285.20	12.92	24.54	20.80	31.50	14.12	0.87

X29井大安寨段全取心, PL10井大二一大三段全取心, LQ2井与X29井取心段为大一段. 为分析不同岩性段的特征, 各井均选取纯页岩、页岩夹介壳层、页岩与介壳层互层、介壳灰岩等样品若干.

针对各类岩性样品设计了TOC测定、主微量元素测试, 分析其古环境及有机质丰度特征及差异. 岩心样品TOC值测定在核工业北京地质研究院实验室采用LECO CS-230碳分析仪进行, 执行标准为GB/T 19145-2003, 测量精度为0.45%. 主微量元素分析测试在应急管理部国家自然灾害防治研究院进行, 依照标准GB/T 14506.28-2010使用X射线荧光光谱(XRF)鉴定主要元素的氧化物, 包括 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , MnO , MgO , TiO_2 和 P_2O_5 , 误差小于5%. 对于微量元素的测试, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS PE300D)进行测定, 误差为 $0.1 \times 10^{-12} \sim 9 \times 10^{-12}$, 执行标准为GB/T 14506.30-2010.

3 岩性段及岩性组合划分

3.1 岩性特征

结合大安寨段21口岩心观察结果发现, 大二亚段主要发育3种岩性类型, 含介壳页岩、灰黑色页岩、介壳灰岩类(包括泥质介壳灰岩、灰色介壳灰岩)(图2a~2c), 其次在大一和大三亚段浅湖高能带主要发育灰色介壳灰岩, 浅湖相带的局部洼地发育

少量泥灰岩. 大安寨段页岩具有典型陆相湖盆沉积的特征, 岩性在纵向、横向上变化快, 单一岩性发育较少, 通常以页岩与含介壳页岩、介壳灰岩互层或者夹层的形式发育. 含生物介壳页岩是大安寨段页岩的独特性, 因此, 本文针对大二亚段中富含介壳的页岩层段进行观察分析, 进一步从中识别出较为特殊的岩性段并命名为介壳层, 其特征为富含生物介壳的页岩层段, 沉积面上表现出灰白色(图2d), 层理面上表现为灰黑色页岩, 截断面上富含生物介壳, 介壳较为完整, 直径为毫米级—厘米级(图2e).

鉴于大安寨页岩段岩性在时空上变化快, 夹层发育频繁, 在考虑其复杂特征的基础上, 结合夹层、互层的划分方案, 以及识别出的介壳层, 观察到大安寨段页岩的岩性发育呈现出韵律性特征, 从下到上依次发育A块状介壳灰岩段, B页岩与介壳层互层段, C页岩夹介壳层段, D纯页岩段(图3), 单个岩性段厚0.4~2.0 m. 由于本次研究主要为大二亚段页岩层系, 大安寨段中发育的块状灰色泥质介壳灰岩、灰白色介壳灰岩特征相似, 镜下均为泥晶生物介壳灰岩(图4b), 因此统一划为A块状介壳灰岩段以便于后续研究分析.

通过观察岩心层理面上生物壳体的数量和分布情况, 描述其介壳发育的密集程度, 测量统计截面上壳体直径大小、B与C两种岩性段中介壳层的厚度以及介壳层发育的密度(条/m). 4类岩性段的

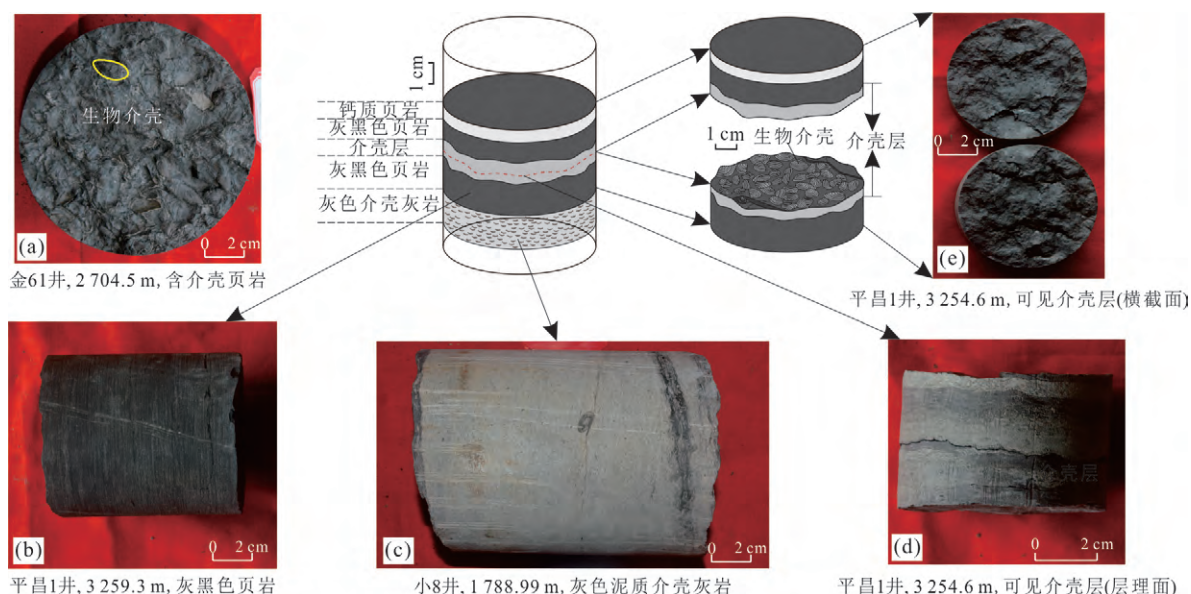


图2 大安寨段大二亚段岩性类型及介壳层特征

Fig.2 Lithological types and shell-rich layer characteristics of the Da2 sub-member

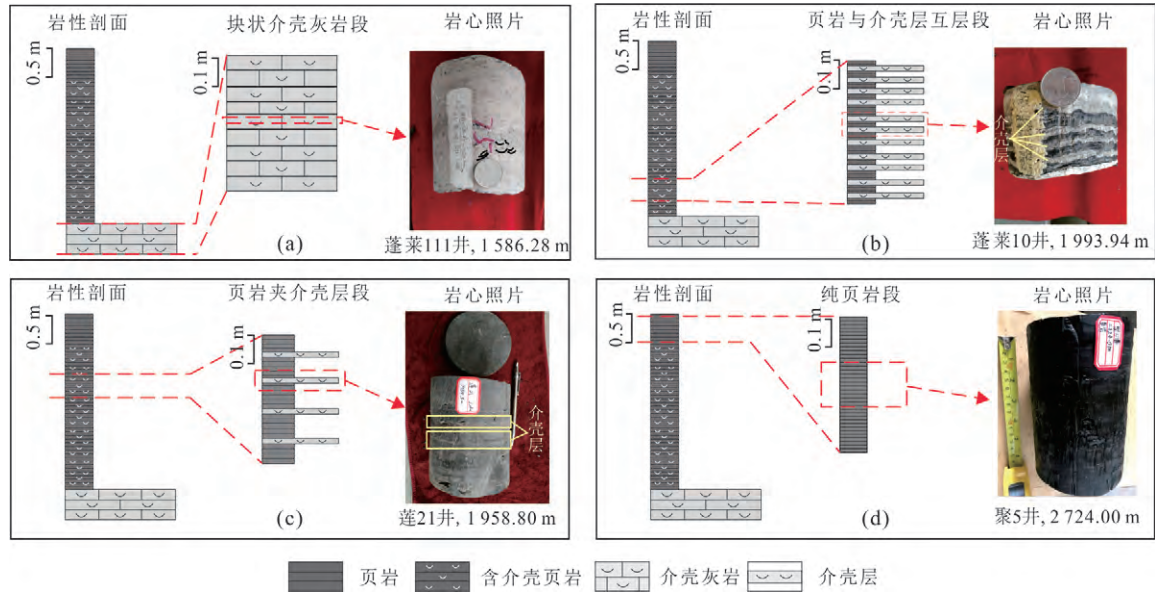


图 3 大安寨段页岩层系 4 类岩性段模式及特征

Fig.3 Modes and characteristics of four types of lithologic sections in the Da'anzhai shale series

a.A 块状介壳灰岩型; b.B 页岩与介壳层互层型; c.C 页岩夹介壳层型; d.D 纯页岩型

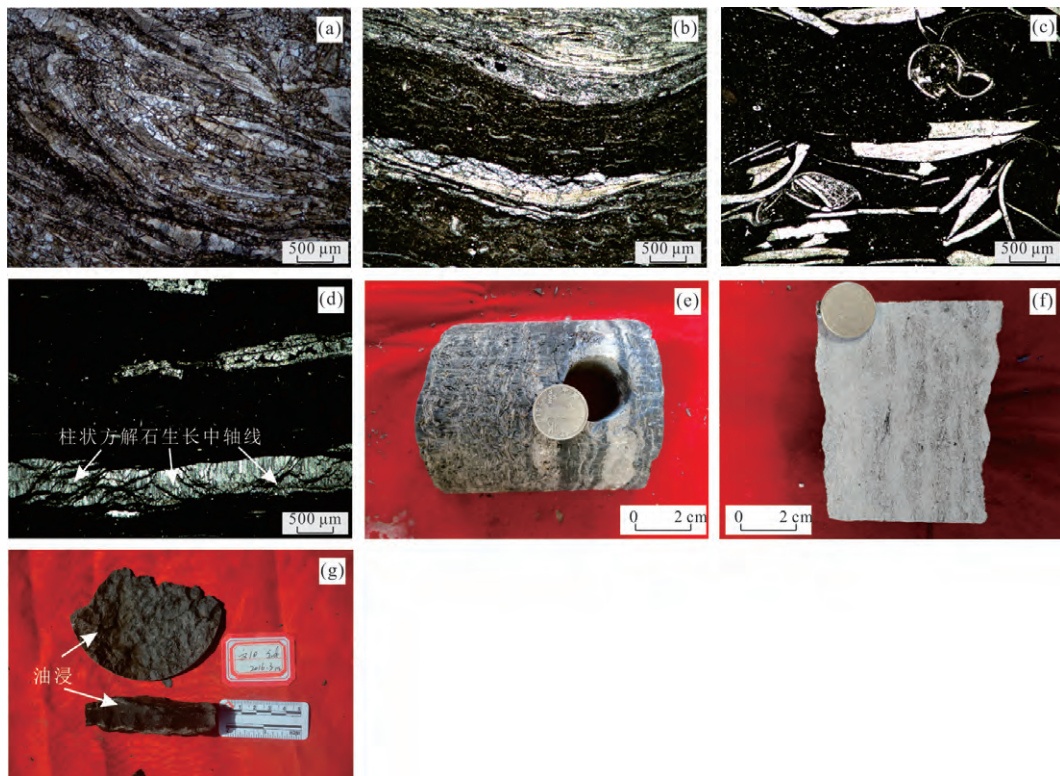


图 4 大安寨段岩石镜下照片和岩心照片

Fig.4 Microscopic photos of different lithologies in the Da'anzhai Member

a.单偏光,25x,蓬莱 10,介壳灰岩,2 033.30 m,大量介壳破碎堆积;b.单偏光,25x,蓬莱 10,含介壳页岩,2 019.10 m,含细小介壳的页岩与介壳层互层;c.单偏光,25x,蓬莱 10,含介壳页岩,2 029.80 m,完整生物介壳零星分布,无压实现象;d.单偏光,25x,蓬莱 10,纯页岩,1 995.30 m,几乎不含生物介壳;e.蓬莱 10,含介壳页岩,2 014.95~2 016.75 m,介壳破碎堆积,灰黑色页岩与介壳层呈突变接触,底部可见冲刷面;f.蓬莱 10,灰色块状介壳灰岩,2 014.95~2 016.75 m,生物介壳破碎细小并呈定向排列;g.文 10,含介壳页岩,页岩夹介壳层,2 016.30 m,可见油浸现象

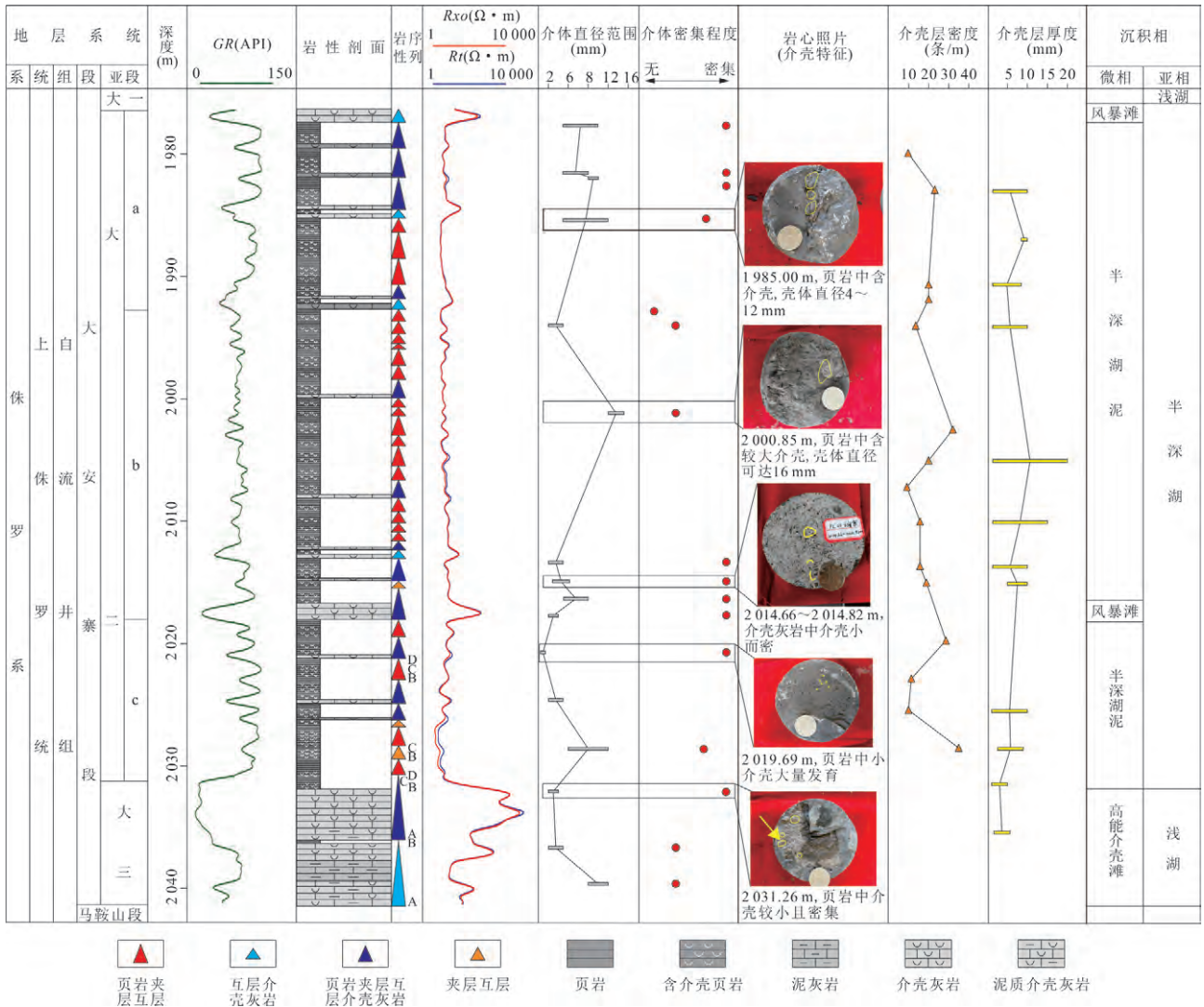


图 5 PL10 井各岩性组合类型纵向分布特征及介壳发育特征柱状图

Fig.5 Column of vertical distribution characteristics of each lithological combination type and shell development characteristics in Well PL10

介壳发育特征表现出明显差异。A 块状介壳灰岩段：为灰色介壳灰岩、泥质介壳灰岩 (图 3a)，其中生物介壳直径 2~8 mm，介壳通常较为破碎且密集发育，并具有定向排列特征，在镜下可以观察到介壳破碎堆叠，孔隙和生物介壳间被泥质杂基充填 (图 4a)。B 页岩与介壳层互层段：页岩厚度与介壳层段厚度呈现出 1:1 (图 3b)，壳体直径为 2~12 mm，通常介壳发育密集，且介壳层密度为 16~35 条/m，介壳层单层厚 2~10 mm，镜下介壳层与含细小介壳的泥页岩层互层，细小介壳顺层定向排列 (图 4b)；C 页岩夹介壳层段：层系中页岩与介壳层比值大于 2:1 (图 3c)，介壳层中介壳较多且直径为 5~10 mm，页岩中介壳较少，介壳层密度相对较低，12~16 条/m，介壳层单层厚度为 2~20 mm，通常发育零星的生物壳体，无堆

叠压实现象，形态保存较好 (图 4c)。D 纯页岩段：主要以灰黑色页岩为主，几乎不含介壳 (图 3d)，并且碳酸盐矿物发生重结晶，形成柱状方解石 (图 4d)。单井整体分析表明，当介壳层密度大于 20 条/m 时，介壳直径小于 10 mm 时，生物壳体发育较为密集，但在 PL10 井 1992 m 处介壳层密度高，介壳在层理面上密集程度不高，壳体直径在 6 mm 左右 (图 5)，可能是由于介壳类生物的发育程度主要取决于当时生存的水体环境，低密度小壳体堆积也能在地质作用下形成介壳层。

3.2 岩性组合划分及分布规律

3.2.1 岩性组合类型 在大量岩心观察的基础上，总结出 4 类岩性段之间可发育 4 种组合类型，单个完整序列为 ABCD 型组合 (图 6a)，也可发育 A 介壳

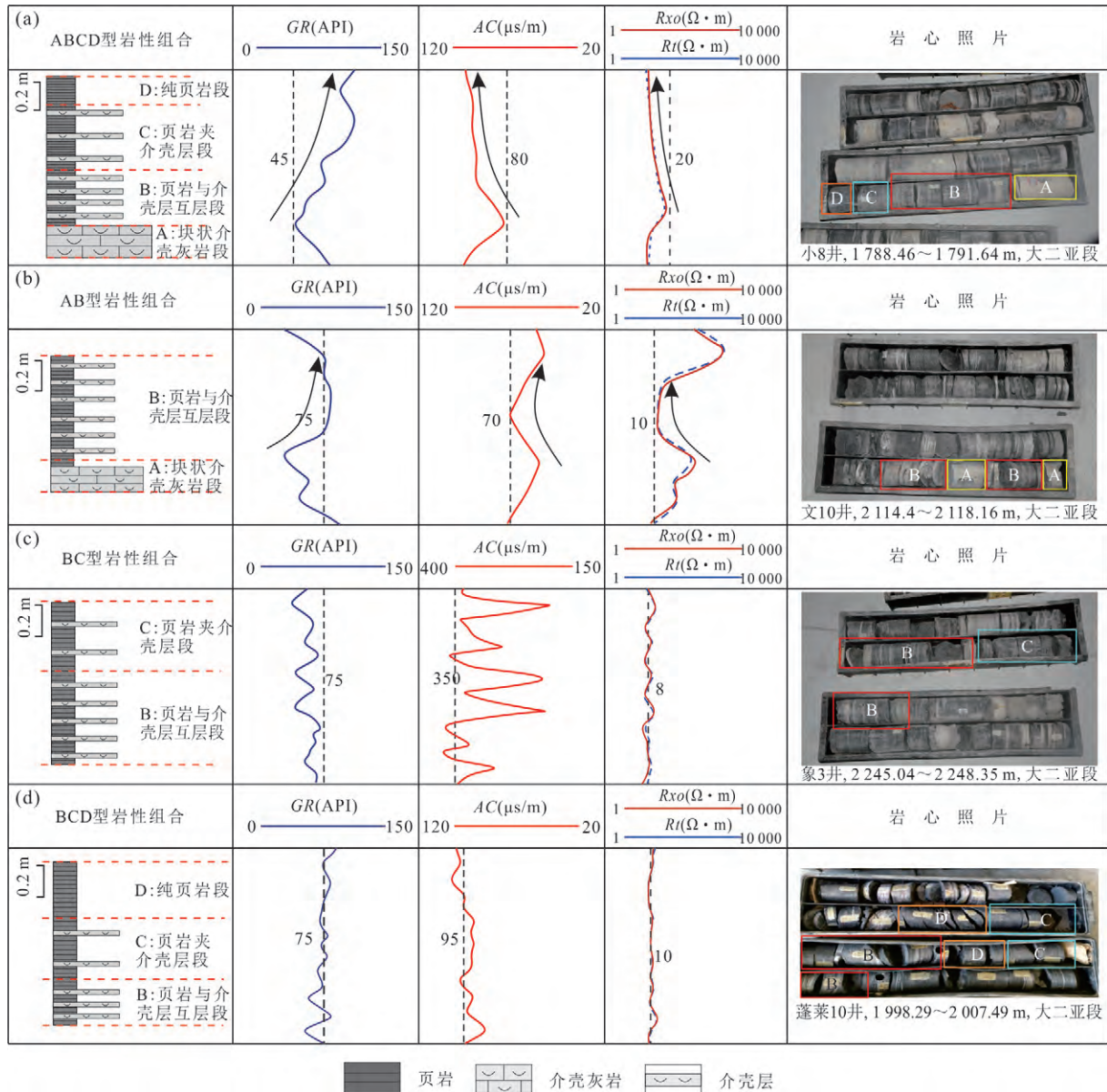


图 6 大安寨段页岩 4 类岩性组合发育组合模式

Fig.6 The development pattern of the four types of lithological combinations in the Da'anzhai Member

灰岩+B灰黑色页岩与介壳层互层组合(图 6b),上部缺失页岩夹介壳层与纯页岩段,以及B灰黑色页岩与介壳层互层+C灰黑色页岩夹介壳层组合(图 6c),B灰黑色页岩与介壳层互层+C灰黑色页岩夹介壳层+D纯页岩组合(图 6d)。

3.2.2 岩性组合分布规律 不同的沉积环境决定不同的沉积物和沉积过程,在陆相湖盆中岩性组合的发育类型受控于沉积环境.进一步对大安寨各亚段、各沉积相带发育的岩性组合类型进行统计分析研究发现,大二亚段以BCD型岩性组合发育为主,在大一、大三亚段均主要发育ABCD型岩性组合(图 7).在单井纵向上(以PL10井为例),大三亚段

主要发育与块状介壳灰岩相关的岩性组合类型,以ABCD与AB型为主,其中介壳破碎严重,格架清晰且介壳排列杂乱为典型为高能介壳滩沉积(图 4f).向上过渡到大二c亚段,底部发育部分BCD型组合,这是由于该层段位于滨浅湖与半深湖的过渡带,水体环境较深,沉积了较厚的页岩;湖侵期水体继续加深,由于间歇性风暴作用,在大二c亚段顶部形成介壳滩沉积.大二b亚段以BCD型为主,表明大二b亚段厚层页岩的中部为最大湖泛面,水体最深,在该段顶部和底部发育部分ABCD与AB型组合,与水体变浅关系密切.向上水体逐渐变浅到湖坡位置沉积,由此大二a亚段发育部分AB、ABCD

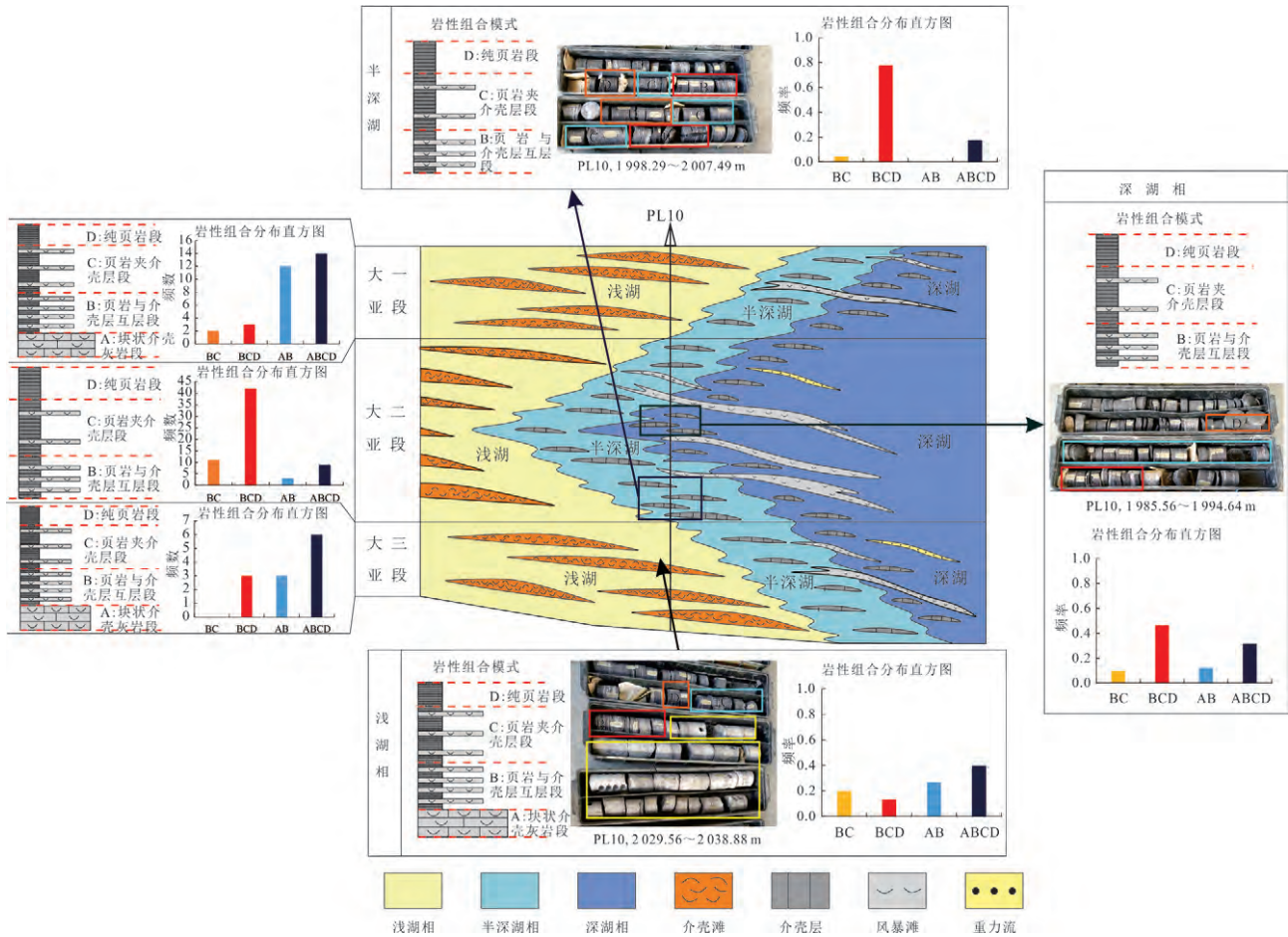


图7 大安寨3个亚段各相带岩性组合类型分布特征模式

Fig.7 Distribution characteristic pattern of lithological combination types in each sub-member and facies

型组合,整体体现出页岩与介壳灰岩互层的特点.从不同相带来看,深湖相以BCD型组合为主,对应大二下段大套灰黑色页岩段,其中还发育部分ABCD型组合,这与远源风暴流形成介壳滩沉积有关,特征表现为灰黑色页岩与介壳灰岩呈现突变接触关系,底部可见冲刷面与泥砾(图4e)(冯荣昌等,2015).半深湖相主要发育BCD型组合,对应大套灰黑色页岩、灰黑色页岩夹介壳层或与介壳层互层段.浅湖相主要发育与块状介壳灰岩段相关的ABCD型与AB型组合,以及部分BCD型组合(图7).

4 四类岩性段环境特征

4.1 古气候与水体环境特征

4.1.1 古气候 古气候会影响湖盆的物源供给条件、湖平面变化、水体环境,在一定程度上古气候也控制着古盐度的变化,同时古气候与水体环境联合控制了碳酸盐岩的沉积.沉积物中金属元素的丰度受气候影响明显,潮湿气候下富集的金属元素(Fe、

Mn、Cr、V、Ni等)含量与干旱气候下富集的金属元素(Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba等)含量的比值计算出气候指数“C值”,用于表征古气候.干旱条件下 $C < 0.2$;半干旱 $0.2 < C < 0.4$;半干旱—半潮湿情况下 $0.4 < C < 0.6$;半潮湿 $0.6 < C < 0.8$;潮湿气候下 $C > 0.8$ (赵增义等,2007).参考前人标准,利用气候指数“C值”对大安寨页岩层系各类岩性段古气候特征进行分析表明,从A段到D段的旋回序列整体经历了从干旱到潮湿气候的变化(表2),其中A介壳灰岩段以干旱气候为主,Ca、Mg元素富集有利于介壳灰岩的形成;B段气候指数 $C > 0.6$ 的样本数占56.3%,表现为干旱的样本数约占40%,说明B类岩性段主要形成于干旱与潮湿气候过渡的交替期,表现出半干旱—半潮湿气候;C段以半潮湿气候为主,大于70%的样本点表现出半潮湿或潮湿气候,D段为半潮湿—潮湿气候(图8).大安寨段页岩有机质类型主要为II₁—II₂型(杨跃明等,2019),半潮湿—潮湿的古气候有利于陆生植物与低等水生

表 2 各类岩性段有机质丰度及古沉积环境参数统计表

Table 2 Statistics of organic matter abundance and paleo-sedimentary environment parameters of various lithological sections

岩性段类型	有机质丰度		古气候		氧化还原环境		古生产力			沉积速率	古盐度	
	TOC		气候指数 C		V/(V+Ni)		Ba _{bio}			(La/Yb) _N	Sr/Ba	
	数值(%)	数量(个)	数值	数量(个)	数值	数量(个)	均值(10 ⁻⁶)	数量(个)	均值	数量(个)	均值	数量(个)
A 段	0.03~1.18	25	0.014~0.044	8	0.376~0.724	8	204.48	8	1.34	8	4.90	8
	0.35		0.031		0.612							
B 段	0.27~2.25	21	0.027~0.848	16	0.466~0.814	16	530.10	15	1.22	16	1.00	16
	0.72		0.489		0.718							
C 段	0.42~3.11	33	0.136~0.950	20	0.557~0.811	20	625.40	20	1.23	20	0.40	20
	1.34		0.609		0.728							
D 段	0.32~2.40	18	0.265~1.008	9	0.584~0.827	9	596.84	9	1.18	9	0.37	9
	1.17		0.640		0.748							
准噶尔盆地芦草沟组页岩	2.23~9.42	—	0.480~0.610	—	0.600~0.800	—	—	—	—	—	1.29	—
	4.47		0.540		0.740							
沧东凹陷孔二段页岩	0.13~12.92	—	—	—	0.480~0.910	—	—	—	—	—	—	—
	4.87		—		0.720							
济阳拗陷沙三段页岩	0.49~1.74	—	—	—	0.790~0.960	—	284	—	—	—	—	—
	1.12		—		0.880							

注: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$; 符号“—”代表无数据信息; 准噶尔盆地芦草沟组页岩据林晓慧等(2019), 蒋中发等(2020); 沧东凹陷孔二段页岩据周立宏等(2018), 李圻等(2020); 济阳拗陷沙三段页岩据 Wang *et al.* (2020).

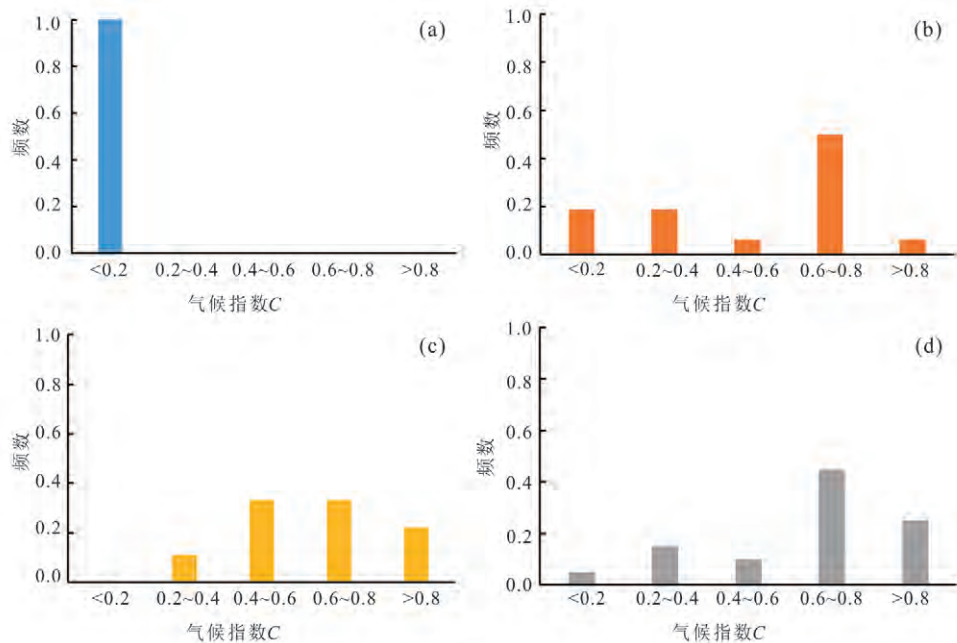


图 8 各类岩性段气候指数 C 频率分布直方图

Fig.8 Frequency distribution histograms of climate index C of various lithology sections

a. A 介壳灰岩段气候指数 C 分布特征; b. B 页岩与介壳层互层段气候指数 C 分布特征; c. C 页岩夹介壳层段气候指数 C 分布特征; d. D 纯页岩段气候指数 C 分布特征

生物的生长繁殖,为沉积有机质的产生与保存奠定基础(付金华等,2018),因此,C段与D段具有更优质的古气候条件。

4.1.2 氧化还原环境 通常情况下,有机质在缺氧的还原水体环境下有助于保存(Hunt, 1979)。V、Ni、Cr、Ce等元素在不同的氧化还原环境中具有分异作用(Taylor and McLennan, 1985; Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994),由此 $V/(V+Ni)$ 、 Ce/La 、 δCe 等可作为判别古水体氧化环境的参数。 $V/(V+Ni) < 0.46$ 指示含氧环境, $0.46 < V/(V+Ni) < 0.60$ 指示贫氧环境, $V/(V+Ni) > 0.60$ 代表其为缺氧环境; $Ce/La < 1.5$ 代表水体为含氧环境, Ce/La 介于 $1.5 \sim 1.8$ 为贫氧环境, $Ce/La > 1.8$ 为缺氧水体环境; δCe 正常—正异常(富集)即 $Ce_{anom} > -0.1$ 指示缺氧环境, $Ce_{anom} < -0.1$ 指示富氧环境(Yang *et al.*, 2019)。利用上述判别参数对大安寨段总体及4类岩性段的氧化还原环境特征进行分析可得,整体上为缺氧还原环境,有利于有机质保存(图9)。从不同岩性段类型来看,A介壳灰岩段 $V/(V+Ni)$ 值在 $0.376 \sim 0.724$ 之间,均值为 0.612 ; B段 $V/(V+Ni)$ 值在 $0.466 \sim 0.814$ 之间,均值为 0.718 ; C段与D段 $V/(V+Ni)$ 值分别介于 $0.557 \sim 0.811$ 与 $0.584 \sim 0.827$, 平均值分别为 0.728 和 0.748 。4类岩性段 Ce/La 参数 ($1.91 \sim 2.44$, 均值为 2.10) 均大于 1.8 , Ce_{anom} ($-0.061 \sim 0.009$, 均值为 -0.023) 也都大于 -0.1 。因此,整体来看,4类岩性段A、B、C、D段氧化还原环境差距小,均主要为缺氧环境,仅有少量样本点位于含氧—贫氧环境。

4.2 古盐度特征

Sr元素丰度与Sr/Ba比值被用作定性分析古盐度参数在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地得到广泛应用。前人大量研究认为 $Sr/Ba > 1$ 时为咸水环境, $0.5 < Sr/Ba < 1$ 时为半咸水环境, $Sr/Ba < 0.5$ 时为淡水环境(郑荣才等,1999)。通过统计研究区内4口井获取的Sr/Ba比值表明, $Sr/Ba < 1$ 的样品数占比75.47%,并结合图版可以发现大安寨段大体上为微咸水环境(图10)。在不同岩性段类型下,A介壳灰岩段Sr/Ba比均值为4.90,以咸水环境为主;B段均值为1.00,水体为半咸水—咸水环境;C段与D段均值分别为0.40与0.37,均为淡水环境(表2)。长7段优质陆相页岩沉积环境主要为淡水环境,芦苇沟组页岩为半咸水环境(孙莎莎等,2015;林晓慧等,度条2019),与大安寨段中C、D岩性段具有相似的古盐

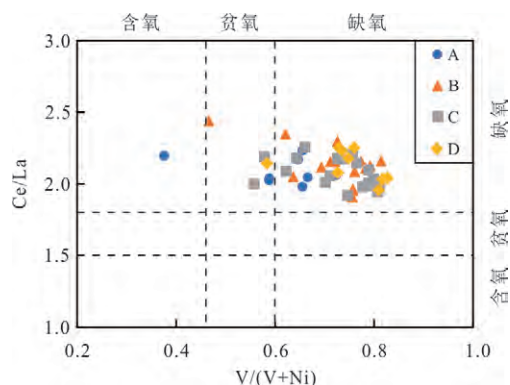


图9 大安寨段页岩氧化还原环境特征

Fig.9 Redox environmental characteristics of shale in the Da'anzhai Member

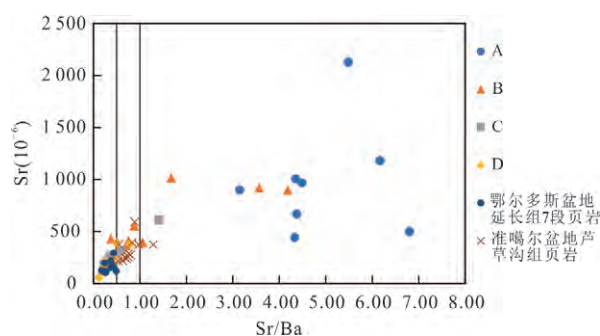


图10 各类岩性段古盐度特征

Fig.10 Paleo-salinity characteristics of various lithological sections

件。总体上从A段到D段的旋回序列呈现出从咸水到淡水变化的特征。

4.3 沉积速率与古生产力特征

4.3.1 沉积速率 沉积速率在一定速率范围内有利于有机质的富集(Stein, 1986; Ding *et al.*, 2015)。微量元素分析被用作分析沉积速率的常用方法,高 $(La/Yb)_N$ 反映了低沉积速率,低 $(La/Yb)_N$ 反映了高沉积速率(Elderfield and Greaves, 1982; 胡俊杰等,2014)。利用 $(La/Yb)_N$ 参数对大安寨段各岩性段进行定性表征发现,A介壳灰岩段 $(La/Yb)_N$ 均值为1.34, B页岩与介壳层互层段均值为1.22, C页岩夹介壳层段与D纯页岩段均值分别为1.23与1.18, A段相比其他岩性段而言沉积速率较慢, B、C、D段均表现出相对较高的沉积速率特征(表2)。

4.3.2 古生产力 生物钡含量与古生产力相关,可运用生物钡定量表征古生产力的大小(Bernstein *et al.*, 1998; 倪建宇等,2006)。根据生物钡含量计算关系式对大安寨段各类岩性段的生物钡丰度计算分析表明, A介壳灰岩段生物钡均值为 $204.48 \times$

10^{-6} , 泥质介壳灰岩古生产力较低; B 页岩与介壳层互层段与 C 页岩夹介壳层段均值分别为 530.10×10^{-6} 和 625.40×10^{-6} , 具有较高的古生产力, 有机质来源更加充足; D 段生物钡丰度平均值为 596.84×10^{-6} (表 2)。渤海湾盆地沙三段生物钡丰度在 $75 \times 10^{-6} \sim 435 \times 10^{-6}$ 之间, 均值为 284×10^{-6} , 表现为中等古生产力 (Wang *et al.*, 2020)。因此, 大安寨段各类岩性段中 C 段与 D 段古生产力较高, B 段与 C、D 段相比稍低, A 段介壳灰岩古生产力水平低。

4.4 沉积环境纵向变化特征

前文所述的大安寨段沉积环境存在较大的差异, 在纵向上变化较大。以 PL10 井大二亚段为例, 根据环境参数的变化特征划分了 4 个阶段, 不同阶段发育的岩性组合各不相同 (图 11)。

I 阶段: 古气候主要表现为半潮湿。气候指数 C 介于 $0.6 \sim 0.8$, $V/(V+Ni)$ 与 Sr/Ba 无较大变化, 水体环境稳定, 为淡水还原环境; $(La/Yb)_N$ 值位于 1.1 附近, 生物钡稳定在 500×10^{-6} , 有机质含量小于 1%, 以 B 和 C 类岩性段为主。

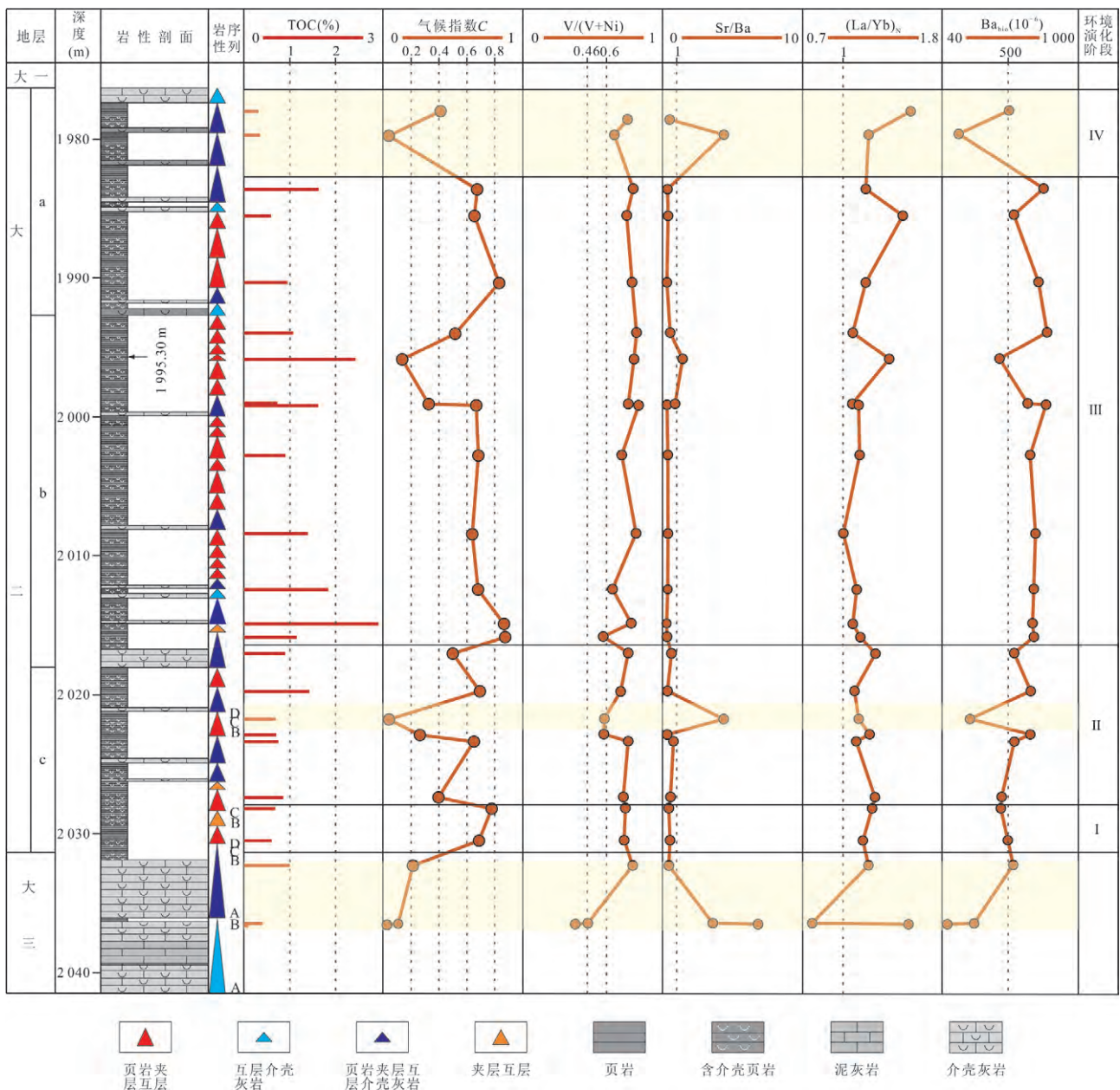


图 11 川中地区 PL10 井大安寨段大二亚段沉积环境纵向变化特征

Fig.11 Variations of sedimentary environment characteristics in the second submember of Da'anzhai Member in Central Sichuan

II 阶段:古气候出现干旱—潮湿交替变化的特征.在 2 020~2 022 m 处干旱程度最高,此时 $V/(V+Ni)$ 降低, Sr/Ba 远大于 1,水体为贫氧化环境,不利于藻类生长,使古生产力下降,随后气候向潮湿转变,古生产力增加,水体加深,因此有机质也表现出前期低,后期较高,ABCD 型与 BCD 型组合交替出现.

III 阶段:整体上半潮湿—潮湿的气候较为稳定,水深较大,水体盐度低且还原性强,有机质在初期和中期出现高值,多数样本点 TOC 大于 1 或接近 1,主要发育 BCD 型,TOC 高值主要对应 C 类岩性段.在 1 995.3 m 处样本点气候指数 C 小于 0.2,在薄片下为黑色页岩以及重结晶柱状方解石(图 4d),导致现今样本测量出大量 Ca 元素,使得气候指数 C 偏低.

IV 阶段:古气候向干旱转变,气候指数小于 0.4, Sr/Ba 增大且远大于 1, $(La/Yb)_N$ 值远偏离 1,表明沉积速率降低,同时生物钡降低,该阶段水体咸化变浅,有机质含量低,以 ABCD 型岩性组合为主.

5 有利岩性段优选

页岩 TOC 含量是评价页岩油勘探潜力的重要依据,指示其生烃能力及含油性的大小.因此,需对有机质含量进行评价,明确不同岩性段类型下有机质富集的差异程度.对大安寨段 97 个样品进行分级统计表明,TOC 主要分布在 $<1.0\%$,占比 70.10%; TOC 介于 $1.0\% \sim 2.0\%$,占比 19.59%; TOC $>2.0\%$ 占比较低,为 10.31%.说明大安寨段页岩整体 TOC 含量较低,平均值 0.92%.中国石化在东部断陷盆地陆相页岩建立的有利区有机碳下限为 1.0% (黄东等,2018),借鉴东部的勘探经验,将大安寨段页岩有利岩性段 TOC 标准确定为 1.0% .为了更好地优选岩性段类型,本文将 $<1.0\%$ 、 $1.0\% \sim 2.0\%$ 、 $>2.0\%$ 作为分级界线,并分别命名为贫有机质、含有机质与富有机质,从而更直观地表征其生烃能力和含油性(李卓等,2017).

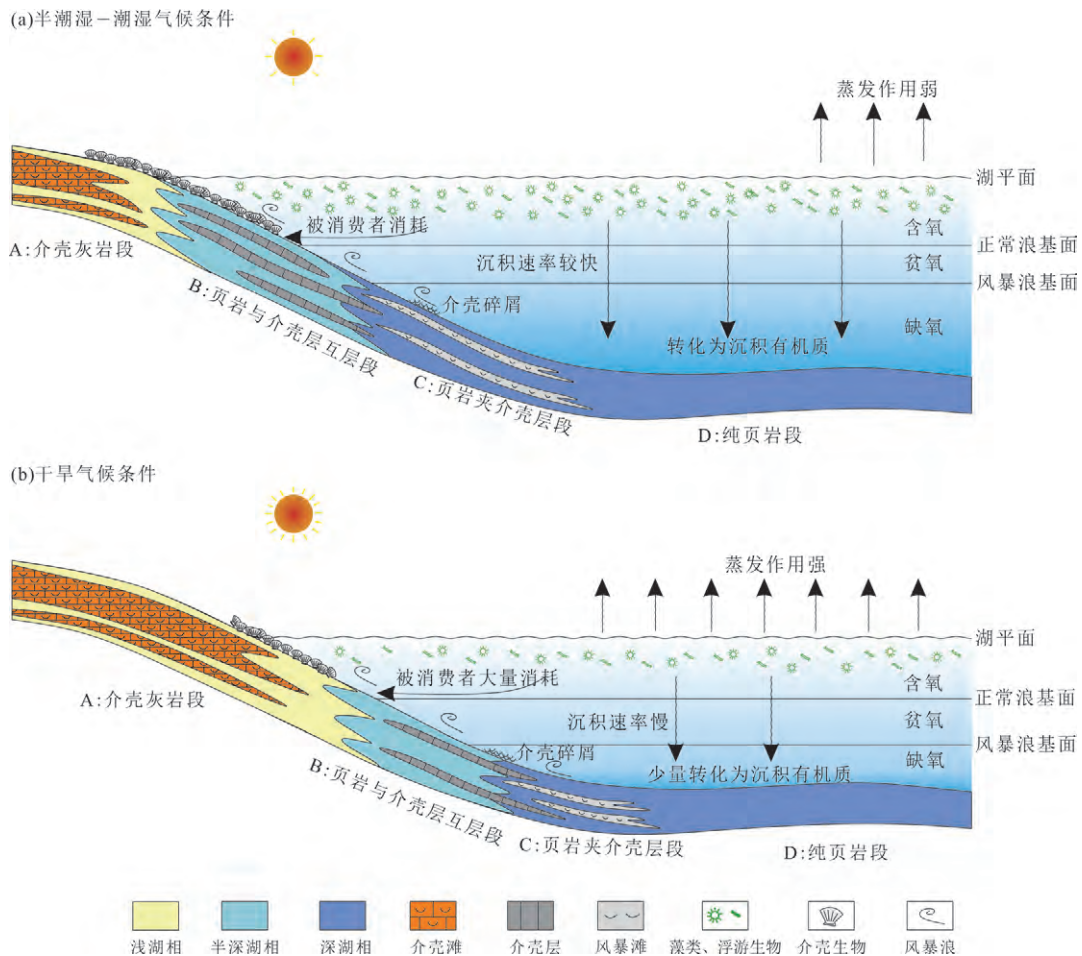


图 12 川中地区大二亚段有机质富集模式

Fig.12 Organic matter enrichment model of the second submember of Da'anzhai Member in Central Sichuan

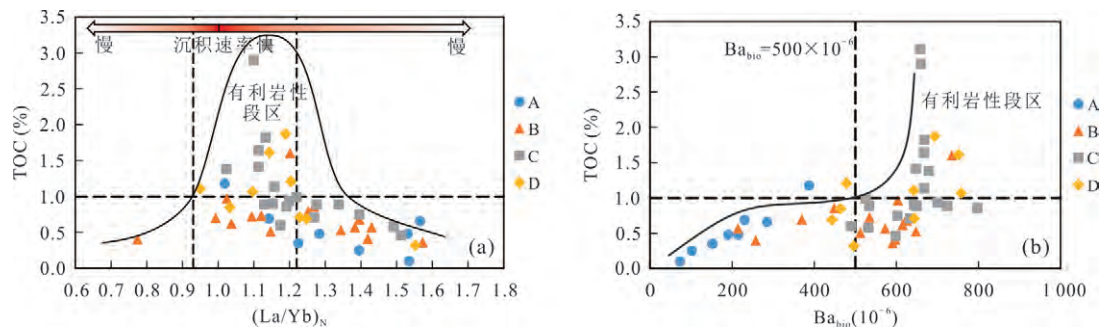


图 13 (La/Yb)_N与 TOC 的关系(a)和生物钡与 TOC 的关系(b)

Fig.13 The relationship between (La/Yb)_N and TOC (a) and the relationship between biological barium and TOC (b)

表 3 大安寨段页岩有利岩性段评价标准

Table 3 Evaluation criteria for favorable lithology combinations of shale in Da'anzhai Member

评价参数	评价标准
TOC	>1.0
古气候	半潮湿—潮湿
古盐度	半咸水—淡水
古生产力(Ba _{bio})	>500×10 ⁻⁶
水体环境	缺氧还原环境
沉积速率	相对适中

参照 TOC 分级界线对 4 类岩性段进行评价发现, A 介壳灰岩段 TOC 介于 0.03%~1.18%, 均值为 0.35%, 仅存在一个异常点 TOC>1%, 为贫有机质组合类型; B 互层段主要以贫有机质为主, TOC 最大达 2% 以上, 均值为 0.72%, 有机质较 A 段更为富集. C 页岩夹介壳层段为含有机质类型, TOC 介于 0.42%~3.11%, 均值为 1.34%, 有机质相比 B 段互层型更为富集. D 段表现为含有机质特征, TOC 介于 0.32%~2.40%, 均值为 1.17% (表 1).

各类岩性段及组合的古环境特征、沉积速率、古生产力均影响着有机质的生成与保存. 潮湿气候带来营养物质使得大量藻类和低等水生生物繁盛, 在为介壳等生物提供食物来源的同时有更多的进一步转化为沉积有机质, 保证了充足的有机质来源; 蒸发作用弱, 底水缺氧还原的半咸水—淡水环

境有利于有机质的保存及生烃, 因此, A 段和 B 段中藻类的消耗和富氧的环境导致其缺乏有机质来源及保存条件, C 段和 D 段相比较来看, 更靠近湖盆中心, 具有更好的有机质富集条件 (图 12a). 但在干旱条件下, 湖盆中藻类和低等水生生物较少, 大量被消费者消耗后导致有机质来源不足, 因此各类岩性段中 TOC 含量均较低, 不利于有机质的生成与保存 (图 12b). 为了进一步确定沉积速率与有机质含量的关系与控制作用, 通过 (La/Yb)_N 与 TOC 的关系图可以发现, 沉积物沉积速率过快或者过慢都不利于有机质的保存, 只有当沉积速率处于一个合适的阶段时, 有机质的含量达到一个高值区. 这表明适当的沉积速率才有利于有机质的富集, 过快或者过慢都会因为稀释作用导致有机质含量下降. 因此, 针对这一特征确定了沉积速率参数 (La/Yb)_N 在 0.93~1.22 范围内指示有机碳含量高值区 (图 13a). 古生产力在一定程度上较大地影响了有机质的生成, 高古生产力是优质页岩的重要特征. 因此, 将生物钡与 TOC 进行拟合可以发现, TOC 与生物钡丰度存在一定的正相关性, 高古生产力提供了更多的原始沉积有机质, 当生物钡丰度高于 500×10⁻⁶ 时, TOC 出现较高值, 表明当古生产力达到一定数值之后, 沉积有机质更有利于富集, 因此, 确定了古生产力 (Ba_{bio}) 下限为 500×10⁻⁶ (图 13b). 综合上述分析, 可以总结出大安寨段有利岩性段的判别标准 (表 3).

表 4 各类岩性段特征综合统计

Table 4 Comprehensive statistics for characteristics of various lithological sections

岩性段类型	TOC (均值)	古气候	古盐度	沉积速率	古生产力	古氧化还原环境
A 介壳灰岩段	贫有机质 (0.35)	干燥	咸水	相对较慢	低	缺氧还原
B 页岩与介壳互层段	贫有机质 (0.72)	半干燥—半潮湿	半咸水	相对适中	较低	缺氧还原
C 页岩夹介壳层段	含有机质 (1.34)	半潮湿	半咸水—淡水	相对适中	较高	缺氧还原
D 纯页岩段	含有机质 (1.17)	潮湿	淡水	相对适中	较高	缺氧还原

运用上述标准对 A、B、C、D 段 4 种岩性段类型进行评价(表 4), C 页岩夹介壳层段中较高的生产力、潮湿的气候与适中的沉积速率使其具有较高的有机质丰度, 缺氧还原的半咸化—淡水环境有利于其有机质的保存与转化。岩心观察中, 可在 C 页岩夹介壳层段见到油浸现象(图 4g), 西南油气田新井龙安 1 井在 3 508.8~3 510.2 m 页岩夹介壳层段发现气测异常, 井测含油饱和度高, 测试含气量介于 2.2~2.8 m³/t, D 段测试含气量为 1.1~1.8 m³/t, 因此 C 段为有利岩性段类型, 相比较而言 D 段次之。另外, 从岩性组合的角度来看, 大二亚段发育的大套 BCD 型岩性组合最优。

6 结论

(1) 川中地区大安寨段大二亚段主要发育 3 种岩性: 含泥介壳灰岩、灰黑色页岩以及含介壳页岩。针对大二亚段生物介壳发育的特殊性, 识别划分出一类特殊岩性段: 介壳层, 其为富含生物介壳的页岩层段。

(2) 大安寨段页岩的岩性发育呈现出韵律性特征, 自下而上依次为 4 类岩性段: A 块状介壳灰岩段、B 页岩与介壳层互层段、C 页岩夹介壳层段、D 纯页岩段。岩性段间组合类多样, 主要有 ABCD 型、AB 型、BC 型和 BCD 型 4 类, 大二亚段主要发育 BCD 型。

(3) 结合有机质丰度、古水体环境、古盐度、古气候、古生产力等特征, 对 4 类岩性段特征进行表征分析, 认为 C 页岩夹介壳层段中较高的生产力与潮湿的环境、适中的沉积速率使其具有较高的有机质丰度, 缺氧还原的半咸水—淡水环境为有机质保存与转化奠定基础, 为有利岩性段, 相比而言 D 纯页岩段次之。整体上看大二亚段发育的大套 BCD 型岩性组合最优。

附表见地球科学官网 (<http://www.earth-science.net>)。

References

- Bernstein, R. E., Byrne, R. H., Schijf, J., 1998. Acantharians: A Missing Link in the Oceanic Biogeochemistry of Barium. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45(2/3): 491—505. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(97\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(97)00095-2)
- Ding, X. J., Liu, G. D., Zha, M., et al., 2015. Relationship between Total Organic Carbon Content and Sedimentation Rate in Ancient Lacustrine Sediments: A Case Study of Erlian Basin, Northern China. *Journal of Geochemical Exploration*, 149: 22—29. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.11.004>
- Elderfield, H., Greaves, M. J., 1982. The Rare Earth Elements in Seawater. *Nature*, 296(5854): 214—219. <https://doi.org/10.1038/296214a0>
- Feng, R. C., Wu, Y. Y., Yang, G., et al., 2015. Storm Deposition of the Da'anzhai Member (Jurassic) in Central Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(5): 909—918(in Chinese with English abstract).
- Fu, J. H., Li, S. X., Xu, L. M., et al., 2018. Paleosedimentary Environmental Restoration and Its Significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(6): 936—946(in Chinese with English abstract).
- Fu, S. T., Yao, J. L., Li, S. X., et al., 2020. Enrichment Characteristics and Resource Potential of Continental Shale Oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(5): 698—710 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Ye, Y. P., He, J. X., et al., 2020. Development Practice of Continental Shale Oil in Jimsar Sag in the Junggar Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(2): 133—141(in Chinese with English abstract).
- Hatch, J. R., Leventhal, J. S., 1992. Relationship between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA. *Chemical Geology*, 99(1/2/3): 65—82. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90031-Y](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90031-Y)
- Hu, J. J., Li, Q., Fang, N. Q., et al., 2014. REE Geochemical Characteristics and Geological Significance of Sedimentary Rocks of the Lower Permian Zhanjin Formation in Central Uplift Zone of Qiangtang Basin, Northern Tibet Plateau. *Journal of Palaeogeography*, 16(6): 926—934(in Chinese with English abstract).
- Huang, D., Duan, Y., Li, Y. C., et al., 2018. Study on the TOC Lower Limit of Shale Oil and Gas of Freshwater Lake Facies: A Case Study on the Jurassic Da'anzhai Member in the Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 23(6): 38—45(in Chinese with English abstract).
- Hunt, J. M., 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Jiang, Z. F., Ding, X. J., Wang, Z. Q., et al., 2020. Sedimentary Paleoenvironment of Source Rocks of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag. *Lithologic Reser-*

- voirs, 32(6): 109—119(in Chinese with English abstract).
- Jones, B., Manning, D.A.C., 1994. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geology*, 111(1/2/3/4): 111—129. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-X)
- Li, Y., Liu, K.Y., Pu, X.G., et al., 2020. Lithofacies Characteristics and Formation Environments of Mixed Fine Grained Sedimentary Rocks in Second Member of Kongdian Formation in Cangdong Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science*, 45(10): 3779—3796(in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Jiang, Z.X., Tang, X.L., et al., 2017. Lithofacies Characteristics and Its Effect on Pore Structure of the Marine Shale in the Low Silurian Longmaxi Formation, Southeastern Chongqing. *Earth Science*, 42(7): 1116—1123(in Chinese with English abstract).
- Li, Z.M., Tao, G.L., Li, M.W., et al., 2019. Favorable Interval for Shale Oil Prospecting in Coring Well L69 in the Paleogene E₃st in Zhanhua Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(2): 236—247 (in Chinese with English abstract).
- Lin, X.H., Zhan, Z.W., Zou, Y.R., et al., 2019. Elemental Geochemical Characteristics of the Lucaogou Formation Oil Shale in the Southeastern Junggar Basin and Its Depositional Environmental Implications. *Geochimica*, 48(1): 67—78(in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Shi, J.X., Fu, X.F., et al., 2021. Petrological Characteristics and Shale Oil Enrichment of Lacustrine Fine-Grained Sedimentary System: A Case Study of Organic-Rich Shale in First Member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 828—838(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.B., Liu, G.X., Hu, Z.Q., et al., 2019. Lithofacies Types and Assemblage Features of Continental Shale Strata and Their Significance for Shale Gas Exploration: A Case Study of the Middle and Lower Jurassic Strata in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 39(12): 10—21(in Chinese with English abstract).
- Ni, J.Y., Pan, J.M., Hu, C.Y., et al., 2006. Biogenic Barium Distribution in Surface Sediments of South China Sea and Its Relationship to Primary Productivity. *Geochimica*, 35(6): 615—622(in Chinese with English abstract).
- Song, M.S., Liu, H.M., Wang, Y., et al., 2020. Enrichment Rules and Exploration Practices of Paleogene Shale Oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 225—235(in Chinese with English abstract).
- Stein, R., 1986. Organic Carbon and Sedimentation Rate—Further Evidence for Anoxic Deep-Water Conditions in the Cenomanian/Turonian Atlantic Ocean. *Marine Geology*, 72(3/4): 199—209. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(86\)90119-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(86)90119-2)
- Sun, S.S., Yao, Y.B., Lin, W., 2015. Elemental Geochemical Characteristics of the Oil Shale and the Paleo-Lake Environment of the Tongchuan Area, Southern Ordos Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 642—645(in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks, 312.
- Wang, Q.F., Jiang, F.J., Ji, H.C., et al., 2020. Effects of Paleosedimentary Environment on Organic Matter Enrichment in a Saline Lacustrine Rift Basin: A Case Study of Paleogene Source Rock in the Dongpu Depression, Bohai Bay Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195: 107658. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107658>
- Wang, W., Huang, D., Yi, H.Y., et al., 2019. Stratigraphic Division and Geochemical Characteristics of Freshwater Lacustrine Shale: A Case Study of Jurassic Da'an-zhai Section, Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 41(5): 724—730(in Chinese with English abstract).
- Wu, S.Q., Tang, X.S., Du, X.J., et al., 2013. Geologic Characteristics of Continental Shale Oil in the Qianjiang Depression, Jiangnan Salt Lake Basin. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 36(3): 282—286(in Chinese with English abstract).
- Xi, K.L., Li, K., Cao, Y.C., et al., 2020. Laminae Combination and Shale Oil Enrichment Patterns of Chang 7₃ Sub-Member Organic-Rich Shales in the Triassic Yan-chang Formation, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(6): 1244—1255(in Chinese with English abstract).
- Xie, W.R., Yang, W., Yang, G., et al., 2010. Pore Structure Features of Sandstone Reservoirs in the Upper Triassic Xujiache Formation in the Central Part of Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 21(3): 435—440(in Chinese with English abstract).
- Yang, W., Zuo, R. S., Chen, D. X., et al., 2019. Climate and Tectonic-Driven Deposition of Sandwiched Continental Shale Units: New Insights from Petrology, Geochemistry, and Integrated Provenance Analyses (the Western Sichuan Subsiding Basin, Southwest China). *International Journal of Coal Geology*, 211: 103227. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103227>

- Yang, Y.M., Huang, D., Yang, G., et al., 2019. Geological Conditions to Form Lacustrine Facies Shale Oil and Gas of Jurassic Daanzhai Member in Sichuan Basin and Exploration Directions. *Natural Gas Exploration and Development*, 42(2): 1–12(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Z., Zhou, L.H., Pu, X.G., et al., 2019. Favorable Formation Conditions and Enrichment Characteristics of Lacustrine Facies Shale Oil in Faulted Lake Basin: A Case Study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 40(9): 1013–1029(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.Y., Zhao, J.H., Wang, H.J., et al., 2007. Distribution Characteristics and Applications of Trace Elements in Junggar Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 30(2): 30–32, 40(in Chinese with English abstract).
- Zheng, R.C., Liu, M.Q., 1999. Study on Palaeosalinity of Chang 6 Oil Reservoir Set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 3–5(in Chinese with English abstract).
- Zhou, L.H., Pu, X.G., Xiao, D.Q., et al., 2018. Geological Conditions for Shale Oil Formation and the Main Controlling Factors for the Enrichment of the 2nd Member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 29(9): 1323–1332(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 冯荣昌, 吴因业, 杨光, 等, 2015. 川中大安寨段风暴沉积特征及分布模式. *沉积学报*, 33(5): 909–918.
- 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义. *石油勘探与开发*, 45(6): 936–946.
- 付锁堂, 姚泾利, 李士祥, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力. *石油实验地质*, 42(5): 698–710.
- 高阳, 叶叶平, 何吉祥, 等, 2020. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油开发实践. *中国石油勘探*, 25(2): 133–141.
- 胡俊杰, 李琦, 方念乔, 等, 2014. 藏北羌塘盆地中央隆起带下二叠统展金组沉积岩稀土元素地球化学特征及其地质意义. *古地理学报*, 16(6): 926–934.
- 黄东, 段勇, 李育聪, 等, 2018. 淡水湖相页岩油气有机碳含量下限研究: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例. *中国石油勘探*, 23(6): 38–45.
- 蒋中发, 丁修建, 王忠泉, 等, 2020. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组烃源岩沉积古环境. *岩性油气藏*, 32(6): 109–119.
- 李圻, 刘可禹, 蒲秀刚, 等, 2020. 沧东凹陷孔二段混合细粒沉积岩相特征及形成环境. *地球科学*, 45(10): 3779–3796.
- 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 等, 2019. 渤海湾盆地济阳拗陷沾化凹陷 L69 井古近系沙三下亚段取心段页岩油勘探有利层段. *石油与天然气地质*, 40(2): 236–247.
- 李卓, 姜振学, 唐相路, 等, 2017. 渝东南下志留统龙马溪组页岩岩相特征及其对孔隙结构的控制. *地球科学*, 42(7): 1116–1123.
- 林晓慧, 詹兆文, 邹艳荣, 等, 2019. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境意义. *地球化学*, 48(1): 67–78.
- 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 等, 2019. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义: 以四川盆地中下侏罗统为例. *天然气工业*, 39(12): 10–21.
- 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等, 2018. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件: 以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例. *石油勘探与开发*, 45(5): 828–838.
- 倪建宇, 潘建明, 扈传昱, 等, 2006. 南海表层沉积物中生物钼的分布特征及其与初级生产力的关系. *地球化学*, 35(6): 615–622.
- 宋明水, 刘惠民, 王勇, 等, 2020. 济阳拗陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践. *石油勘探与开发*, 47(2): 225–235.
- 孙莎莎, 姚艳斌, 齐文, 2015. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区油页岩元素地球化学特征及古湖泊水体环境. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 642–645.
- 王玮, 黄东, 易海永, 等, 2019. 淡水湖相页岩小层精细划分及地球化学特征: 以四川盆地侏罗系大安寨段为例. *石油实验地质*, 41(5): 724–730.
- 吴世强, 唐小山, 杜小娟, 等, 2013. 江汉盆地潜江凹陷陆相页岩油地质特征. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 36(3): 282–286.
- 蕙克来, 李克, 操应长, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7₃ 亚段富有机质页岩纹层组合与页岩油富集模式. *石油勘探与开发*, 47(6): 1244–1255.
- 谢武仁, 杨威, 杨光, 等, 2010. 川中地区上三叠统须家河组砂岩储层孔隙结构特征. *天然气地球科学*, 21(3): 435–440.
- 杨跃明, 黄东, 杨光, 等, 2019. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气形成地质条件及勘探方向. *天然气勘探与开发*, 42(2): 1–12.
- 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等, 2019. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例. *石油学报*, 40(9): 1013–1029.
- 赵增义, 赵建华, 王海静, 等, 2007. 准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用. *天然气勘探与开发*, 30(2): 30–32, 40.
- 郑荣才, 柳梅青, 1999. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究. *石油与天然气地质*, 20(1): 3–5.
- 周立宏, 蒲秀刚, 肖敦清, 等, 2018. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩油形成条件及富集主控因素. *天然气地球科学*, 29(9): 1323–1332.